

デジタル直接駆動スピーカによる低歪化の実現

著者	田澤 智也
出版者	法政大学大学院理工学・工学研究科
雑誌名	法政大学大学院紀要．理工学・工学研究科編
巻	62
ページ	1-5
発行年	2021-03-24
URL	http://doi.org/10.15002/00023937

デジタル直接駆動スピーカによる 低歪化の実現

REALIZATION OF LOW DISTORTION BY
DIGITAL DIRECTION-DRIVEN SPEAKER

田澤智也

Tomoya TAZAWA

指導教員 安田彰

法政大学大学院理工学研究科電気電子工学専攻修士課程

We propose a drive method that reduces distortion due to speaker nonlinearity in a digital direct-driven system. If the diaphragm of the speaker accurately takes only two values, it means that it is operating linearly. Therefore, it was verified by actual measurement whether the distortion was actually reduced.

Key Words : digital direct-driven system, binary drive, distortion rate, delta-sigma modulation

1. はじめに

音を再生するオーディオシステムは、一般に DAC とパワーアンプ、スピーカで構成されている。音を再生する際、入力信号は波形が変化せずそのまま出力されることが望ましい。しかし、変換や増幅などによって歪は必ず発生する。オーディオシステムの中でも、DAC やアンプは電子回路技術の高精度化や回路設計技術により、低歪化が実現している。

スピーカはパワーアンプで増幅した電気信号を物理振動、すなわち音に変換する装置である。信号を音に変換する際、スピーカは様々な要因により歪が発生する。そのため、スピーカはオーディオシステムで一番歪が発生する部分となっている。スピーカから発生する歪を低減できれば、オーディオシステム全体の歪を小さくできる。

一般的なオーディオシステムの他に、デジタル直接駆動スピーカシステムがある。このシステムはスピーカをデジタル信号で駆動する。このとき仮に、スピーカの振動板が 2 値のみで動作できれば線形動作できると言える。実際にスピーカを駆動して音を評価することで歪が小さくなるか検証を行った。

2. デジタル直接駆動スピーカシステム

図 1 に、デジタル直接駆動スピーカシステムの構成のブロック図を示す。デジタル直接駆動システムは $\Delta\Sigma$ 変調器と NSDEM、ドライバ回路で構成されている。このシステムはすべてデジタル回路となっており、スピーカに入力される信号はデジタル信号となる。デジタル信号の音声データはマルチビット $\Delta\Sigma$ 変調器に入力され、駆

動するスピーカの数 M 個とすると $\log_2 M \text{bit}$ の信号に変換される。この変換によって発生する量子化雑音は、 $\Delta\Sigma$ 変調器のノイズシェーピング特性により、高周波帯域へ移動する。 $\Delta\Sigma$ 変調器の出力は重みづけのない温度計コードに変換され、NSDEM に入力される。NSDEM は M 個あるスピーカの使用頻度を均一化させる動作をして、それによりスピーカ間のミスマッチによる出力の非線形性を低減している。そして、NSDEM で選ばれたスピーカをドライバ回路で駆動し、そのスピーカからの出力が空間で合成されることで音声を生成する。

また、図 2 にドライバ回路の回路図を示す。ドライバ回路はスピーカを駆動するための回路である。スピーカを 2 値で駆動させるため、ドライバ回路には H ブリッジ回路を用いている。表 1 にその動作を示す入力端子 p と n それぞれにデジタル信号を入力し、その信号の組み合わせによってスピーカを駆動する。H ブリッジ回路を用いた場合、単電源のみで 2 値出力が可能となる。

システムのクロック周波数は、従来は基本的に数 MHz で動作させており、スピーカに入力される信号は変化が高速である。そのため、スピーカをデジタル信号で駆動しているが振動板は変化の速さに追いつかないため、結果的に振動板は滑らかに動いている。そのため、デジタル信号で駆動する際も、スピーカの振動板の非線形性の影響が出てくると考えられる。

3. 提案手法

デジタル信号でスピーカを駆動した際、仮に振動板が正確に 2 値のみをとる動作をした場合を考える。2 値の

みをとるならばグラフで表すと2点のみとなり、点同士を結ぶと必ず直線の関係となるため線形になっていると言える（図3）。スピーカから発生する歪の原因の1つは振動板の非線形性によるものである。そのため、スピーカの振動板が2値のみをとる動作をするように駆動できれば、スピーカの非線形性による歪を低減できる可能性がある。スピーカに入力されるデジタル信号の変化の頻度下げれば、振動板が正確に2値のみをとる動作に近づくと考えられる。比較的高速応答のできる圧電型スピーカ的一种であるフィルムスピーカを用いた場合、2値駆動を実現出来る可能性がある。

そこで、デジタル直接駆動システムのクロック周波数を変化させて、2種類のフィルムスピーカの歪率の測定を行った。

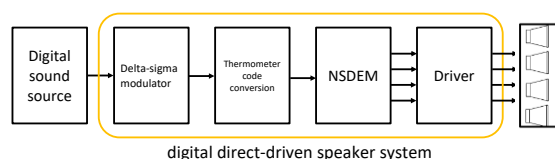


図1 デジタル直接駆動スピーカシステム

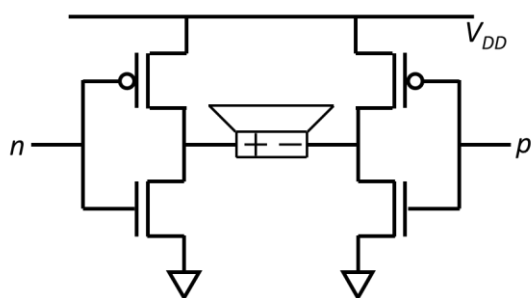


図2 Hブリッジ回路

表1 Hブリッジ回路の動作

NSDEM output	H bridge circuit		Speaker operation
	p	n	
1	1	0	1
0	0	1	-1

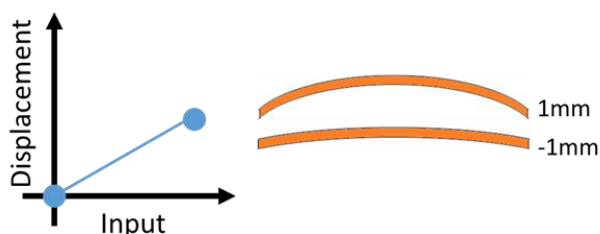


図3 線形の概念図

4. 実測

(1) ドライバ回路の歪率測定

まずは、スピーカ駆動に使用するドライバ回路が十分に低い歪率となっているかを実測により評価した。測定

条件を表2、評価回路を図4に示す。システムの動作周波数を9パターン用意し、ドライバ回路の出力結果をFFTで観測した。そして、FFTの結果より歪率の算出した。表3に歪率の結果を示す。歪率の算出には、後述で説明するがクロック周波数を下げた場合において $\Delta\Sigma$ 変調器によるノイズシェーピングにより高調波が埋もれるため、第2高調波と第3高調波のみを使用した。

歪率の結果は、クロック周波数毎で差が生じているが、全体として0.1%以下になっており十分に低い歪率になっていると言える。

表2 ドライバ回路の歪率測定の条件

Driver voltage	5[V]
Input frequency	1000[Hz]
Number of input signal bits	16[bit]
Input sampling frequency	48[kHz]
Input digital signal magnitude	-6[dBFS]

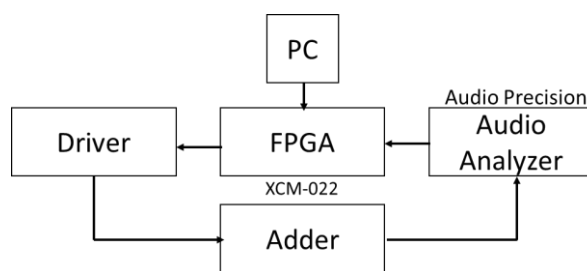


図4 ドライバ回路の歪率測定系

表3 ドライバ回路の出力の歪率結果

Clock frequency [kHz]	Distortion rate [%]
12288	0.1934
6144	0.0649
3072	0.0113
1536	0.0190
768	0.0046
384	0.0012
192	0.0034
96	0.0097
48	0.1404

(2) サイズの小さいフィルムスピーカの測定

a) インピーダンス測定

実測に用いるスピーカのインピーダンスを測定した。その結果を図5に示す。インピーダンスの結果からわかるように、フィルムスピーカは容量性の負荷となっている。そして、ある周波数を境に寄生インダクタンスの影響が出ている。インピーダンスが一番小さい周波数はコンデンサとインダクタの共振周波数となる。このスピー

カの共振周波数は約 450kHz となり、そのときのインピーダンスは約 3.6Ω となった。

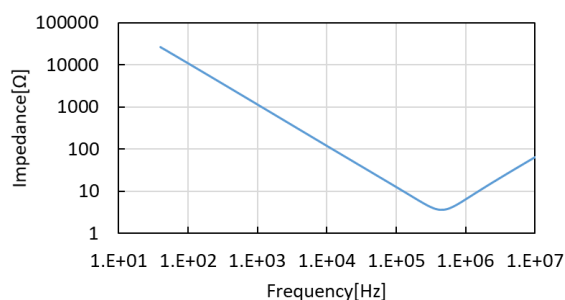


図5 フィルムスピーカのインピーダンス

歪率の結果は、クロック周波数が 1536 kHz のとき一番高くなった。それ以下のクロック周波数になると段々歪率が低下していき、96 kHz のとき歪率が一番小さくなった。クロック周波数が 48 kHz の場合は高調波がノイズに埋もれているため歪率が高くなっている。しかし、ノイズによって高調波が埋もれていなければ、48 kHz 以下の歪率はより低くなったと予想される。

この結果から、クロック周波数を低くしスピーカの動作を遅くすれば振動板が線形の動作に近づき、スピーカの振動板が2値のみの動作に近づいていることが考えられる。これにより、デジタル直接駆動スピーカシステムによりスピーカの非線形性による歪を低減できると考えられる。

b) 歪率測定

測定条件は表4、評価回路を図6に示す。ドライバ回路の測定と同様に、スピーカ出力のFFTを観測し歪率の算出を行った。まず、図7にFFT結果を示す。FFT結果をみると、クロック周波数を下げるにつれて高域側に大きなノイズ成分が現れる。これは、デジタル直接駆動システム内の $\Delta\Sigma$ 変調器によるノイズシェーピング特性によるものである。クロック周波数を下げていくと周波数帯域が狭くなっていくため、信号帯域内にノイズが現れる。よって、歪率の算出には、ドライバ回路の測定と同様に第2高調波と第3高調波のみを使用した。歪率の算出結果を表5、歪率の結果のグラフを図8に示す。

表4 スピーカの歪率測定の条件

Driver voltage	5[V]
Input frequency	500 [Hz]
Number of input signal bits	16[bit]
Input sampling frequency	48[kHz]
Input digital signal magnitude	-6[dBFS]
Distance between microphone and speaker	10[cm]

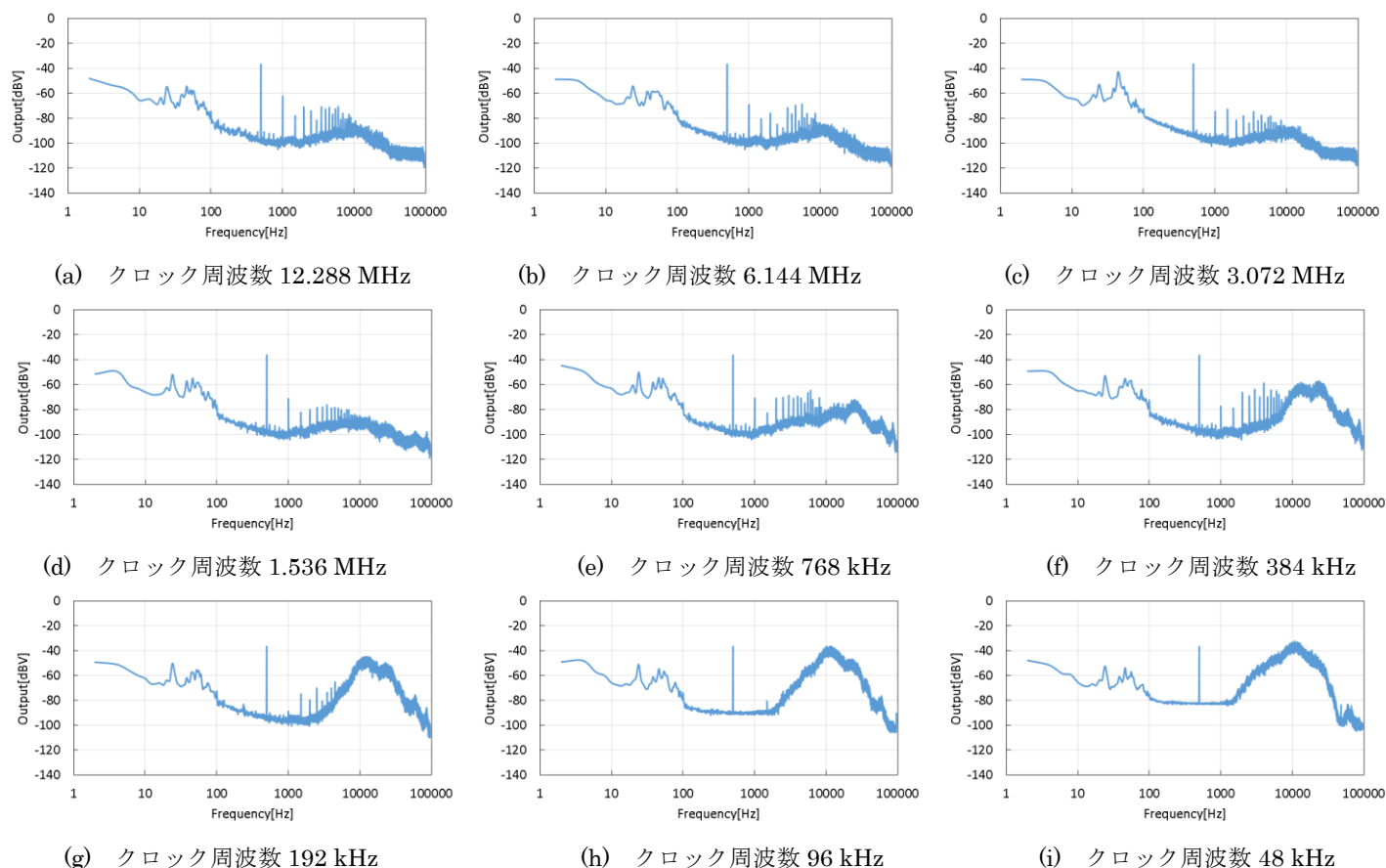


図7 サイズの小さいフィルムスピーカ出力のFFT結果

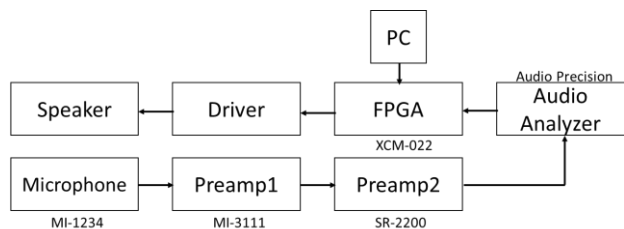


図6 スピーカの歪率測定系

表5 スピーカ出力の歪率の算出結果

Clock frequency [kHz]	Distortion rate [%]
12288	5.3672
6144	2.5015
3072	1.9853
1536	1.8425
768	1.9487
384	1.1796
192	1.2371
96	0.6688
48	1.0168

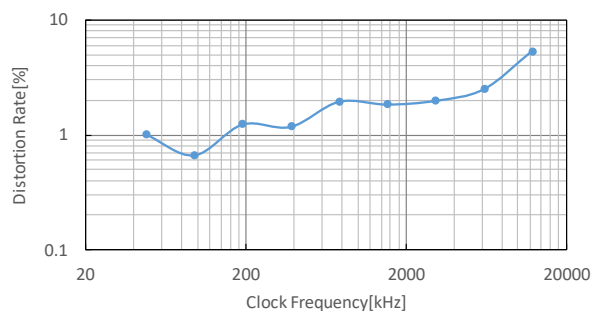


図8 歪率とクロック周波数

約 150kHz となり、そのときのインピーダンスは約 1.4 Ω となった。

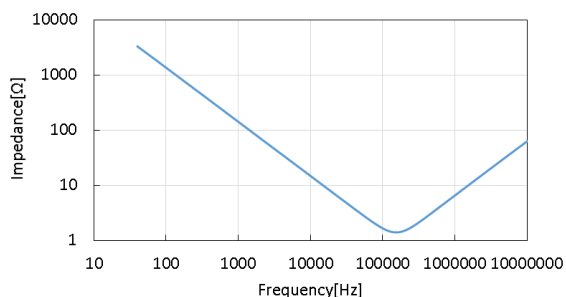


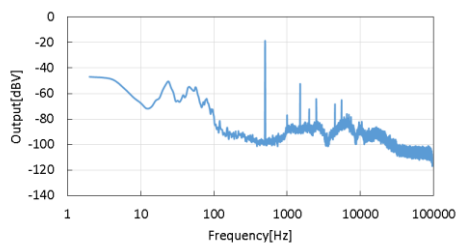
図9 スピーカのインピーダンス

(3) サイズの大きいフィルムスピーカの測定

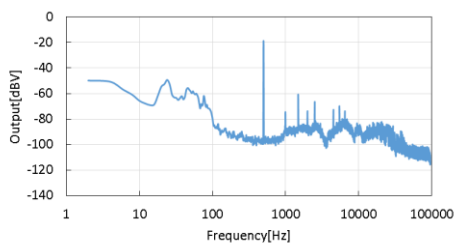
a) インピーダンス測定

こちらも同様にスピーカのインピーダンスを測定した。その結果を図9に示す。このスピーカの共振周波数は

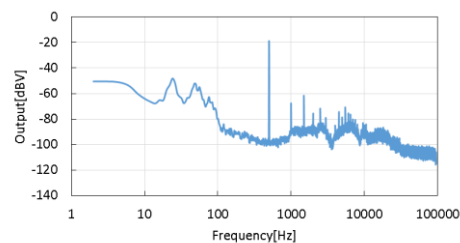
b) 歪率測定



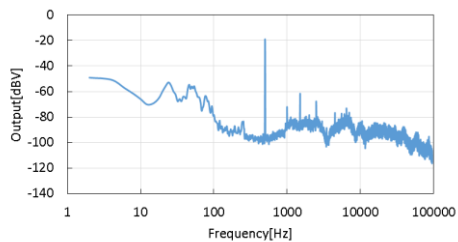
(a) クロック周波数 12.288 MHz



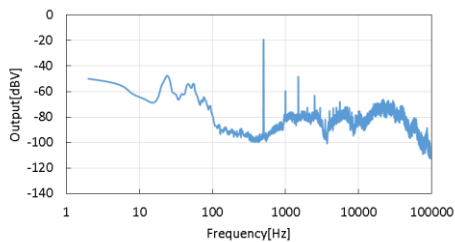
(b) クロック周波数 6.144 MHz



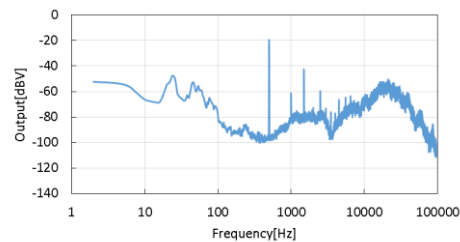
(c) クロック周波数 3.072 MHz



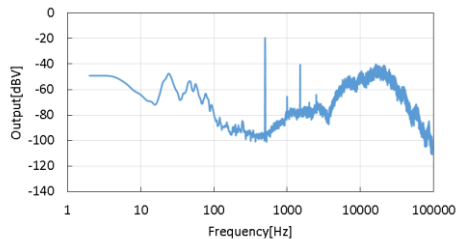
(d) クロック周波数 1.536 MHz



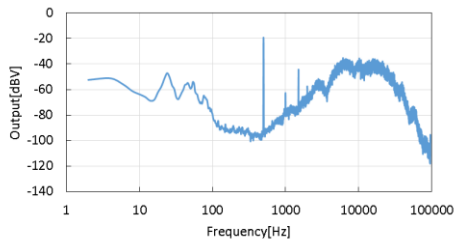
(e) クロック周波数 768 kHz



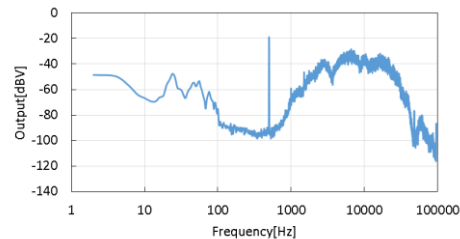
(f) クロック周波数 384 kHz



(g) クロック周波数 192 kHz



(h) クロック周波数 96 kHz



(i) クロック周波数 48 kHz

図10 サイズの大きいフィルムスピーカ出力のFFT結果

測定条件は同様に表 4，評価回路を図 6 に示す．スピーカ出力の FFT 結果を観測し歪率の算出を行った．図 10 に FFT 結果，表 6 に歪率の結果，図 11 に歪率の結果のグラフを示す．歪率の結果は，クロック周波数が 192kHz のとき歪率が一番大きくなった．このスピーカの共振周波数は 150kHz であり，その周波数に近いクロック周波数で歪率が大きくなっている．このことから，共振周波数付近では歪率が大きくなってしまいう可能性がある．

表 6 スピーカ出力の歪率の算出結果

Clock frequency [kHz]	Distortion rate [%]
12288	2.2002
6144	0.8629
3072	0.8585
1536	0.8299
768	3.8591
384	7.4823
192	9.4479
96	5.9978
48	4.6456

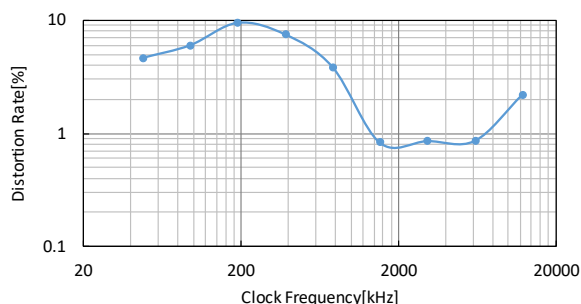


図 11 歪率とクロック周波数

5. まとめ

本論では，デジタル直接駆動スピーカシステムを用い

て，歪みの低いスピーカを実現できるかを実験により検討を行った．

サイズの小さいフィルムスピーカは，デジタル直接駆動システムのクロック周波数を下げていくと，歪率が低下することが確認できた．このことから，スピーカを低速で駆動した場合線形に近い動作をしており，デジタル駆動技術を用いれば歪の低いオーディオシステムを実現できると考えられる．しかし，サイズの大きいフィルムスピーカは，クロック周波数を下げていっても，歪率の低下は確認できず大きくなった．これにより，スピーカのサイズや構造，インピーダンスによって歪率が影響を受けていると考えられる．

クロック周波数を下げていくと周波数帯域幅が狭くなりノイズも大きくなってしまいう．そのため，ノイズが小さく歪の低いオーディオシステムを実現するには，より高速に応答できるスピーカを用意するかスピーカユニット数を増やす必要がある．

また，本稿では歪率の測定を行ったが，これだけでは振動板の正確な動作はわからないので，振動板の動作の解析が必要と考えられる．

謝辞：本研究を進めるにあたり，多くのご指導と助言をいただいた法政大学理工学部電気電子工学科安田彰教授に深く感謝申し上げます．また，本研究にご協力いただいた安田研究室の皆様にもこの場をお借りして感謝申し上げます．

参考文献

- 1) 小谷野進司：「高音用スピーカの歪み発生要因の検討」，PIONEER R&D Vol.13 No.2 (2003)
- 2) 盧原郁、桐生昭訴：「可聴周波数帯域外成分に対するスピーカの混変調歪」，日本音響学会誌，55 巻 4 号 pp.256-264 (1999)